

## 油圧ショベルによる自動掘削における土中障害物の検知手法に関する研究

著者	萱場 光太郎
号	2749
発行年	2001
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/8022">http://hdl.handle.net/10097/8022</a>

氏名	かやば こうたろう		
授与学位	萱場 光太郎		
学位授与年月日	博士(工学)		
学位授与の根拠法規	平成14年3月25日		
研究科、専攻の名称	学位規則第4条第1項		
学位論文題目	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 機械工学第二専攻		
指導教官	油圧ショベルによる自動掘削における		
論文審査委員	土中障害物の検知手法に関する研究		
	東北大学教授 中野 栄二		
	主査 東北大学教授	中野 栄二	東北大学教授 小菅 一弘
		(情報科学研究科)	
	東北大学教授	江村 超	東北大学教授 猪岡 光
			(情報科学研究科)
	東北大学助教授	高橋 隆行	
		(情報科学研究科)	

## 論文内容要旨

### 第1章 緒言

油圧ショベルの操作は、2自由度の2本のレバーを協調して操作する必要があり非常に熟練が必要である。このため、操作性の向上や自動化の研究が多数行われてきた。しかし、それらの研究の多くは埋設されたパイプや石といった土中の障害物の存在を考慮していない。

土中の障害物を傷つけることなく周囲の土を取り除く方法としては次の2つが考えられる。

- あらかじめ障害物の位置を知りその障害物に衝突しないようにバケットを動かして周囲の土を取り除く方法
- バケットと障害物との接近や接触そのものを検知して土中の障害物に大きな力が作用しないようにバケットの動きを変えつつ周囲の土を取り除く方法

センサで測定された障害物の位置情報には、誤差が含まれる。また、油圧ショベルは地面に固定されていないので、作業中に加わった外力により位置がずれる可能性がある。さらに、軟弱な地面をクローラ式の油圧ショベルが移動すると、すべりが発生してデッドレコニングが不正確になることも考えられる。これらの事柄を考えれば、あらかじめ障害物の位置を知る方法は単独で用いられるべきではなく、バケットと障害物との接近や接触を検知する方法と併用されることが望ましい。

これとは逆に、バケットと障害物との接近や接触を検知する方法だけを用いた場合は、あらかじめ障害物の位置を知る方法を使う場合に比べて作業の効率は低下するが、作業の遂行そのものは可能である。このように、バケットと障害物との接近や接触を検知する技術は、土中の障害物を傷つけることなしに周囲の土を自動的に掘削するために重要である。

そこで、本論文ではバケットと土中の障害物との接近・接触の検知手法に関して述べる。またこの際、掘削専用のロボットに限ることなく他の知能ロボットでも障害物回りの土を排除することが可能となるように、地中レーダや電磁センサといった特殊なセンサではなく視覚センサや力覚センサなどのように他の作業にも使われるセンサを使い、バケットと土中の障害物との接近・接触の検知の実現を目指す。

### 第2章 土中の障害物が掘削に及ぼす影響

本章では、土中の障害物が掘削に及ぼす影響について調べる実験を行い、その結果について検討を行っている。土中の障害物が掘削に及ぼす影響としては、掘削反力に対する影響と掘削されて動く土の形状に対する影響とが

考えられる。そこで、市販の小型マニピュレータにバケットを取り付けて、障害物を埋めた場合と埋めない場合とについてそれぞれ掘削中のバケットの傾きや掘削する深さを変えて掘削実験を行った。実験では側面に透明な板を取り付けた土槽を使い、掘削される土の垂直断面形状を画像計測した。これと併せて、バケットの根本に取り付けた力センサを使い掘削中にバケットに作用する掘削反力を測定した。

その結果、土中の障害物は掘削される土の地表面上の形状には大きな影響を与えないが、地表面下の形状には大きな影響を与えることが明らかになった。障害物の近くでは、地表面下にある土が動いた部分と動かない部分との境界線(すべり面)は、バケット先端から障害物に接するように発生する。このため、すべり面の水平面に対する傾きはバケットが障害物に近づくにつれて徐々に急になってゆく。一方、土中の障害物が掘削反力を与える影響については、土中の障害物にバケットが接近する程、掘削反力が増加していく傾向にあることがわかった。受働土圧理論を用いて解析した結果、バケットが障害物に接近するにつれて掘削反力が増大する現象は、バケットが障害物に接近するにつれてすべり面の水平面に対する傾きが増大することから説明可能であった。

以上の結果は、掘削反力から得られる情報を使えばバケットと土中の障害物との接近・接触を検知できる可能性がある一方で、掘削される土の形状を地表面上から計測しただけではバケットと土中の障害物との接近・接触を検知することは困難であることを示している。

### 第3章 力センサを用いたバケットと土中障害物との接近・接触検知手法

本章では、第2章で得られた土中の障害物が掘削反力に及ぼす影響についての知見を踏まえて、掘削反力から得られる情報を使いバケットと土中の障害物との接近・接触の検知を試み、その結果について検討を行っている。第2章と同様に、市販の小型マニピュレータにバケットと掘削反力を測定するための力センサを取り付けて、障害物を埋めた場合と埋めない場合とについてそれぞれバケットの姿勢や掘削する深さを変えて掘削実験を行った。

まずはじめにこの実験結果を使い、掘削反力の変化量の大きさとバケットの変位の大きさととの比の値がある閾値よりも大きくなった場合にバケットと土中の障害物とが接近・接触したものと判断する検知手法を試みた。障害物がない場合の全実験結果から得られた掘削反力の変化量の大きさとバケットの変位の大きさととの比の値の平均値を $\mu$ 、標準偏差を $\sigma$ とする。本論文では接近・接触を判断する際の閾値として、 $\mu \pm 3\sigma$ を便宜的に使用した。この手法では、定常掘削の部分に限って適用した場合5種類の軌道中4種類の軌道で誤検知をすることなく接近を検知することができた。しかし、非定常掘削を含めた掘削の全ての部分に適用した場合は、誤検知をすることなく接近を検知することができたのは5種類の軌道中1種類だけで、その検知距離は定常掘削の部分に限って適用した場合の半分程度になった。

非定常掘削であるバケットの貫入時は、バケットを水平に動かして掘削しているときには見られない垂直上向きの大きな力がバケットに作用する。この垂直上向きの大きな力が、非定常掘削時の誤検知の増大の原因である。さらに、この垂直上向きの大きな力が、閾値を定める $\sigma$ の値を大きくしている。このため非定常掘削の部分にまでこの手法を適用した場合は、バケットが障害物のごく近くまで接近して大きな掘削反力の変化が生じないと検知が出来なくなり、検知距離の低下を招いている。

さて、バケットが障害物に接触した場合は、バケットの進行方向とは逆の向きに反力を受ける。また、障害物に接近した際の掘削反力の変化量は水平成分のほうが垂直成分よりも大きい。掘削反力の変化の成分のうちで、バケットと障害物との接近・接触によって発生するものを検知の指標とすれば、掘削反力の変化量の大きさとバケットの変位の大きさととの比の値を指標に使ったときに問題となった誤検知や検知距離の低下を避けることができる可能性がある。そこで次に、特定方向の掘削反力の変化量とバケットの変位の比を使った検知手法を試みた。特定方向としては、バケットの進行方向を採用した。この検知手法を定常掘削の部分に限って適用した場合の検知結果は、掘削反力の変化量の大きさとバケットの変位の大きさととの比を使った検知手法と大きな差はない。しかし、非定常掘削を含めた掘削の全ての部分に適用した場合は、掘削反力の変化量の大きさとバケットの変位の大きさととの比を使った検知手法に比べて検知距離が2倍程度に延びている。また5種類の軌道中2種類の軌道で誤検知をすることなく接近を検知することができており、誤検知もわずかながら減っている。掘削反力の変化量の大きさとバケットの変位の大きさととの比の値を指標に使う検知手法に比べて、非定常掘削も含めた場合において検知距離が大きく改善している原因は、バケットの進行方向の掘削反力の変化のみを使うようになったため、貫入時に作用する垂直上向きの力の影響が小さくなり、その結果 $\sigma$ が低下したところにある。

#### 第4章.視覚センサと力覚センサを併用した接近・接触検知手法

本章では、第2章で得られた土中の障害物が掘削反力に及ぼす影響と掘削される土の形状に及ぼす影響についての知見を踏まえて、掘削反力と掘削される土の形状から得られる情報を使ってバケットと土中の障害物との接近・接触の検知を試み、その結果について検討を行っている。

掘削反力の変化は、掘削されて動く土の形状、バケットの動かし方、土質等の様々な事柄の影響を受ける。第3章で試みたような、力の変化の情報のみを利用する検知手法は、これらの要素は反映されていないため、基本的によほど大きく掘削反力が変化しないとバケットが土中の障害物に接近・接触したと判断することができない。

そこで本章では、掘削されて動く土の形状、土質、掘削反力の間に成り立つ関係を定める受働土圧理論から導いた式を用いたバケットと土中障害物との接近・接触の検知手法を提案した。提案する手法は、掘削反力を計測する力センサと地表面の形状を計測する視覚センサの2種類のセンサから得られるデータを受働土圧理論から導いた検知のための式に代入し、式の値が0から大きく離れたらバケットと土中の障害物が接近・接触したと判断するものである。

本章では、市販の小型マニピュレータにバケットと掘削反力を測定するための力センサと地表面の形状を計測するための視覚センサを取り付けて、障害物を埋めた場合と埋めない場合とについてそれぞれバケットの姿勢や掘削する深さを変えて掘削実験を行った。バケットと土中障害物との接近・接触を判断する際の閾値として、第3章と同様に障害物がない場合の実験で計算された検知式の計算結果の $\mu \pm 3\sigma$ を便宜的に使用した。

提案する手法に実験結果を適用したところ、バケットが障害物に接近するにつれて検知のための式の値が0から離れた。しかし貫入時にも式の値が0から離れたため、誤検知や検知距離の低下がみられた。この原因は、バケットの貫入時に受働土圧理論の式にはない上向きの力がバケットに作用するためである。そこで、岸らの研究を参考にバケット貫入時に作用する上向きの力を受働土圧理論に組み込み、検知のための式を求めなおした。新たに求めた式を使い検知を試みたところ検知結果の向上が見られた。

#### 第5章 結言

本論文の目的は、土中の障害物周りの掘削を自動化する際に必要となる、バケットと土中障害物との接近・接触の検知を汎用的なセンサを使い実現することである。

はじめに土中の障害物が掘削に及ぼす影響について調べる実験を行い、そこで得られた知見をもとに、力覚センサを使用した検知手法と力覚センサと視覚センサを併用する検知手法を提案しその有効性を実験で検証した。

本論文では以下に示すことが明かとなった。

- 土中の障害物は、掘削される土の地表面上の形状には大きな影響を与えないが、地表面下の形状には大きな影響を与える。また、土中の障害物にバケットが接近する程、掘削反力が増加していく傾向にある。このため、掘削反力から得られる情報を使えばバケットと土中の障害物との接近・接触を検知できる可能性がある一方で、掘削される土の形状を地表面上から計測しただけではバケットと土中の障害物との接近・接触を検知することは困難である。
- 掘削反力から得られる情報を使いバケットと土中の障害物との接近・接触の検知を行う手法では、掘削反力の変化量の大きさとバケットの変位の大きさととの比を検知の指標とする手法に比べてバケットの進行方向の掘削反力の変化量とバケットの変位の比を検知の指標とする手法の方が優れていた。これは、バケットの進行方向の掘削反力の変化量とバケットの変位の比を検知の指標とすると、バケットの貫入時にバケットに作用する垂直上向きの大きな力の影響を低減できるためである。
- 掘削反力と掘削される土の形状から得られる情報を使いバケットと土中の障害物との接近・接触の検知を行う手法においては、受働土圧理論にバケットが貫入時に作用する力の影響を組み込んだモデルから導いた式を、バケットと土中の障害物との接近・接触の検知に用いた。この手法は、バケットの進行方向の掘削反力の変化量とバケットの変位の比を検知の指標とする手法に比べて検知距離が向上している。

## 論文審査の結果の要旨

建設現場においては、省力化と労働環境の改善の観点から建設機械の導入が積極的に行われてきた。建設機械の一種である油圧ショベルの操作は、2自由度の2本のレバーを協調させて操作する必要がある、その習熟には長い時間が必要となる。このため、油圧ショベルの操作性の向上や自動化を実現するための研究が行われてきた。本研究は、油圧ショベルによる掘削作業が特に困難な土中の障害物周りの自動掘削を実現することを目標に、その際に必要となるバケットと土中の障害物との接近・接触の検知手法を理論的、実験的に検証したものであり、全編5章よりなる。

第1章は、緒言であり、本論文の背景と目的とを述べている。また、油圧ショベルによる自動掘削に関する従来の研究を、詳細に検討している。

第2章では、土中の障害物が掘削反力に及ぼす影響と掘削される土の形状に及ぼす影響について実験的に検討をしている。その結果、掘削される土の地表面下の形状は、障害物の有無により大きく変化する一方で、地表面上の形状の変化は、障害物の有無にほとんど影響されないことを明らかにした。土中の障害物が掘削反力に与える影響については、土中の障害物にバケットが接近する程、掘削反力が増加していく傾向にあることを明らかにした。これらの結果より、掘削反力を使えばバケットと土中の障害物との接近・接触を検知できる可能性がある一方で、掘削される土の形状を地表面上から計測しただけではバケットと土中の障害物との接近・接触を検知することは困難であることを明らかにした。これらは、重要な成果である。

第3章は、第2章で得られた知見を踏まえ、掘削反力を計測し、バケットと土中の障害物との接近・接触の検知を試みている。試みた手法は2種類であり、いずれも掘削反力の変化量とバケットの変位との関係を指標とするものである。これらの手法は、現在の油圧ショベルにも容易に適用可能である反面、非定常的な掘削に対応するのは困難であることを実験的に明らかにした。これは、バケットと土中障害物との接近・接触の検知を実現する上で極めて示唆に富むものである。

第4章は、これまでに得られた知見を踏まえ、非定常掘削に対応することを目的とし、地表面の形状と掘削反力の両方の情報を受働土圧理論から導かれる式に適用してバケットと土中障害物との接近・接触を検知する手法を提案している。そして、提案する手法の有効性を実験的に確認している。本章で提案した手法は、非定常掘削にも対応が可能であり、バケットと土中障害物との接近・接触の検知を可能にする実用的な手法として高く評価できる。

第5章では、本論文の結論を述べている。

以上要するに本論文は、まずはじめに土中の障害物が掘削に及ぼす影響について明らかにした。次にその知見をもとに、力覚センサを使用した検知手法ならびに力覚センサと視覚センサを併用する検知手法を提案し、その有効性を実験により検証したもので、建設ロボットの自動化ならびにロボット工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。